

유한요소 모델링을 이용한 아크 스폿 용접의 너깃 형상 예측
Prediction of Nugget Shape by Finite Element Modeling
in Arc-spot Welding

장경복*, 김기순*, 강성수*

* 부산대학교

1. 서론

아크 스폿 용접(arc spot welding)이란 접합되어야 할 두 판재 중 한쪽에 구멍을 뚫은 후 그 구멍을 통해 용탕을 채워 판재를 접합시키는 용접법으로 플러그 용접(plug welding)이라고도 한다. 이 방법은 판재의 한쪽 면만을 통한 접합이 가능하며, 약 6.4mm 두께의 강판까지 겹치기 용접이 가능한 것으로 알려져 있다.¹⁾ 이러한 아크 스폿 용접은 접합부의 한쪽 면만을 가압해주면 되므로 양쪽 면을 동시에 가압해야 하는 저항 점용접 보다 형상의 제약을 적게 받으며 두꺼운 판재까지 용접이 가능하므로 그 사용 가능 범위는 상당히 넓다고 할 수 있다. 이와 같은 이점에도 불구하고 아크 스폿 용접에 대한 연구는 용접 변수와 최적 용접 조건과의 관계²⁾, 인장 전단 시험편에 대한 강도 평가³⁾, 아크 스폿 용접에 의한 조립보의 굽힘 강도에 관한 연구⁴⁾ 등의 실험적인 연구에 의존하고 있다.

그런데, 아크 스폿 용접의 생산성 향상 및 적용성의 확대를 위해서는 공정 자동화가 필수적이며 이를 위해서는 각종의 실험 데이터를 바탕으로 한 용접 공정의 시뮬레이션을 통하여 각종 용접 변수들의 체계적인 검토를 수행함으로써 용접부의 신뢰성 확보가 이루어져야 한다. 특히, 아크 스폿 용접의 경우 용접부의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 접합부의 직경이기 때문에 접합부 형상이 정확히 예측되어진다면 용접부 강도가 최대가 되는 용접 조건을 선정할 수 있을 것이다. 그러나, 아크 스폿 용접 공정의 시뮬레이션을 위한 수치적 모델링에 관한 연구는 아직까지 국내의적으로 보고된 바가 없다. 아크 스폿 용접은 기본적으로 GMAW(Gas Metal Arc Welding)와 유사하나, 용접열원의 이동이 없고 입열이 스폿에 집중되기 때문에 GMAW 보다 짧은 시간에 고입열이 이루어진다.

그러므로, 본 연구에서는 GMAW 공정의 수치적 모델링⁵⁾을 기초로 하고 기존의 실험적인 연구결과⁶⁾에 의한 데이터를 바탕으로 하여 아크 스폿 용접에서 접합부 형상을 예측할 수 있는 유한요소 모델을 정립하고자 하였다.

2. 실험재료 및 용접조건

본 연구에서 피용접재로 경량화, 내식성이 중요시되는 철도 차량의 차체에 주로 사용되는 스테인리스강(STS 304, 두께 2mm)을 사용하였다. Table1은 피용접재의 화학 성분을 나타낸다. 실험을 위한 용접 시험편은 반자동 아크 용접기(Gas Metal Arc Welder)인 Miller사의 Millermatic 250MP를 이용하여 제작하였으며 용접 와이어는 JIS Z3323에 규정되어 있는 0.9mmφ YF 308를 사용하였다. 그리고, 보호 가스로는 Ar(95%)+CO₂(5%)의 혼합가스를 사용하였다. 시험편의 형상은 Fig.1에 나타내었으며, 플러그 용접 시험편 상판의 구멍크기와 접합부의 크기와의 관계를 조사하기 위해 구멍의 직경을 6mm, 6.5mm, 7mm의 세 가지 종류로 하였다.

Table1. Chemical composition of base metal

Material	Chemical composition (wt%)					
	C	Si	P	S	Ni	Cr
STS 304	0.08	1.00	0.045	0.03	8.13	18.20

용접조건 선정은 STS 304의 아크 스폿 용접성에 대하여 기존에 보고된바 있는 실험 결과를 이용하여 선택되어진 용접조건은 Table2와 같다.

Table 2. Welding conditions for arc spot welding

Wire feed velocity(ipm)	Voltage(V)	Time(sec)
353	26	2.5

3.유한요소 모델

본 연구에서는 아크 스폿 용접 공정을 3차원 유한요소 모델을 이용하여 해석하였다. 유한요소 해석은 상용 코드인 MARC를 이용하여 수행하였으며, 본 연구의 목적은 아크 스폿 용접부의 접합부 형상의 정확한 예측이므로 응력해석은 수행하지 않고 열해석(thermal analysis)만을 수행하여 용접 공정 동안의 정확한 온도 사이클을 획득하는 데에 초점이 맞추어 졌다. 즉, 용접 공정 동안의 정확한 온도 사이클을 획득하여 STS 304의 고상 온도를 넘어서는 절점을 구하여 이 부분이 용접부를 형성하는 것으로 간주하여 접합부의 형상을 예측하였다.

일반적으로 용접 공정의 열해석에서 입열이 이루어지는 부분에서는 급격한 온도 구배가 발생하기 때문에 요소를 미세하게 분할하는데, 아크 스폿 용접의 경우 입열이 스폿에 집중되기 때문에 더욱 미세한 요소를 필요로 한다. 사용되어진 요소는 3차원 열해석에 일반적으로 사용되는 8절점 블록 요소(8 node brick element)이며, 요소의 총수는 3576개이고 절점의 총수는 5195개이다. Fig.1은 이러한 요소의 형상을 나타낸다. 그리고, 열해석의 정확성을 위해 재료의 물성치인 비열, 열전도도는 온도의 함수로서 입력하였다. 특히, 열전도도의 경우 용융 금속에서의 섞임 효과(stir effect)를 모사하기 위해 용점을 초과한 온도영역에 대해서는 상당히 큰 값을 적용하였다. 고상과 액상의 상변화에 의한 효과도 재료의 액상과 고상 온도 사이에서 잠열(latent heat)이 일정하게 해방되어지는 형태로 고려되었다.

해석을 위한 경계조건으로는 우선 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기 온도인 20℃로 하였으며 입열 후의 열손실은 주로 자연 대류와 복사에 의해 이루어지는 것으로 간주하였다. 여기서, 자연 대류의 계수 또한 해석의 정확성을 위해 온도의 함수로 입력하였다. 입열 모델은 보호가스(Ar(95%)+CO₂)의 특성에 따라 Fig.2와 같은 형태의 모델을 구성 하였다. 스테인리스강의 경우 표면의 산화를 방지하기 위하여 아르곤과 이산화탄소 또는 아르곤과 헬륨의 보호가스를 사용하는데 헬륨보다는 무거운 아르곤이 평면 위치에서의 용접에 유리하기 때문에 본 연구의 경우 아르곤과 이산화탄소의 혼합가스가 사용되었는데 아르곤 아크 플라즈마의 특성상 용접 비드가 넓고 얇게 형성되기 때문에 이를 기준으로 입열 모델을 구성하였다. 상판 구멍의 직경이 6, 6.5, 7mm의 세 종류이므로 동일 용접조건일 때 상판 구멍 직경이 접합부 직경의 크기에 미치는 영향을 파악하기 위해 일차적으로는 각각의 상판 구멍의 직경만큼 입열이 이루어지는 것으로 간주하였고 다음은 혼합가스의 특성상 상판 구멍 직경보다 넓은 영역에서 입열이 이루어지는 것으로 간주하였다. 이렇게 구성된 입열 모델을 Fig.2에 나타내었다. 그리고, 해석의 정확성을 위해 상판의 구멍에 용접금속이 형성되는 효과를 고려하고자 요소 재생성 기술(element rebirth technique)이 사용되었다. 이것은 Fig.2의 입열 모델에서 Q₁이 입열되는 동안에는 Q₂가 입열될 부분중 상판 구멍 직경 크기내의 요소는 실질적으로 형성되기 전이므로 비활성화 되어있고 Q₂가 입열될 때 활성화 되도록 하는 것이다. 또한, 해석상의 정확성을 위해 수렴의 기준을 한번의 증분에 대하여 허용 하는 최대 온도변화를 20℃로 하였다.

4.해석결과 및 고찰

Fig.3(a)은 상판 직경이 6mm일 경우의 접합부 단면의 절점 번호, Fig.3(b)는 용접 공정 동안 STS304의 고상온도 1400℃를 넘어서거나 이에 가까운 온도까지 도달하는 절점의 온도 사이클을 나타낸 것이다. 절점 2807은 용접 공정 동안 1400℃가 넘어서기 때문에 용융되는 영역으로 볼 수 있고 절점 162는 1400℃에 미치지 못하므로 용융되지 않은 부분으로 볼 수 있다. 그러므로, 접합부는 상표면에서는 절점 2807과 162 사이에서 형성됨을 예측할 수 있다. 상판 절점의 경우(2807, 162, 2803, 319) 입열 Q₁이 이루어질 때 상판 구멍 직경 6mm 내의 요소가 비활성화 되어 있으므로 열전도가 입열 Q₁의 열을 직접 받는 상·하판 사이의 절점(3537, 3727)보다 Q₁이 이루어지는 시간 동안은 온도의 상승이 적음을 알 수 있고, 하판의 절점(3194, 3198, 3355, 3539)의 경우는 입

열 Q_1 이 이루어지는 동안에는 직접적인 입열을 받으므로 급격한 온도상승을 보이다가 입열 Q_2 가 이루어지는 순간에는 Q_2 의 열을 직접적으로 받지 않기 때문에 일정 온도로 다소 유지되다가 입열 Q_2 의 영향을 본격적으로 받기 시작하면서부터 다시 급격한 온도 상승이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. Fig.3(c)는 이렇듯 계산에 의해 예측되어진 접합부의 형상과 실제 측정에 의해 얻어진 형상을 나타낸 것이다. 전체적으로 잘 일치하고 있으나 상·하판 표면에서 다소의 차이를 나타내고 있는데 이것은 두께 방향으로의 요소의 크기가 길이나 폭 방향으로의 요소 크기 보다 상대적으로 커서 두께 방향으로의 입열이 좀 더 세분화하지 되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.4는 상판 구멍 직경이 6.5mm, Fig.5는 7mm 일 때의 데이터를 나타낸 것이다. 상판 구멍의 직경이 커짐에 따라 접합부의 직경이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그런데, 하판에서의 용접부가 증가하여 직경 5mm를 넘어서고 있음을 알 수 있다. 여기서 5mm는 실험적으로 상판 직경이 증가함에 따라 한정된 시간에 용접금속이 채워야할 양이 많아져 상판에는 용입부족 현상이 발생하고 하판에서의 용접금속의 양은 많아져 하판에서 용락 현상이 발생하기 시작하는 하판의 직경이다. 직경의 증가에 따른 상판에서의 용입부족 현상은 해석상의 결과에서도 관찰되고 있다. 즉, Fig.3(c), 4(c), 5(c)로 갈수록 상판 표면의 접합부 직경은 다소 줄어들고 있는 반면 하판 표면의 직경은 계속적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

그러므로, 6.5mm, 7mm 직경의 경우 접합부의 직경은 6mm보다 클지라도 모두 하판에서 용락 현상이 발생하기 때문에 두께 2mm인 STS 304의 아크 스폿 용접에서 상판구멍은 6mm가 가장 적합함을 알 수 있다.

5.결 론

아크 스폿 용접부의 접합부 형상을 예측하기 위한 유한요소 모델을 정립하기 위해 실험적인 데이터를 바탕으로 3차원 유한요소 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1)본 연구에서는 보호가스에 따른 입열 모델, 요소 재생성 기술, 잠열을 통한 액상과 고상의 변태 고려, 열전도도를 이용한 용융부의 혼란효과와 고려 등으로 정확한 열해석을 수행할 수 있었다.
- 2)상판 구멍 직경의 증가에 따라 접합부 직경은 증가하였으나, 상판 표면의 용입부족 현상 과 하판의 용락현상을 해석상의 결과에서도 확인할 수 있었다.
- 3)예측되어진 접합부의 형상은 실험에 따른 접합부의 형상과 상당히 좋은 일치성을 보여주었다.

6.참고문헌

- 1)英國熔接學會. “自動 炭酸가스 熔接”, (1984)
- 2)W. P. Blankenship, etc. “Evaluation of GMA Spot Welding for Assembly of High Performance Sheet Steel Structure”, Welding Journal, March, (1983), pp. 27-33
- 3)小野英彦, “鋼의 CO₂아크스포트 용접(第1報)”, 熔接學會誌, 第51卷(1982), 第7号 pp.604-609
- 4)한명수, 한종만, 이준열, “CO₂ 아크스포트 용접법에 의한 조립보의 굽힘강도에 관한 연구” 대한 용접학회지, 제 15권, 제 4호, (1997)
- 5)P. Tekriwal, J. Mazumder, “Finite Element Analysis of Three Dimensional Transient Heat Transfer in GMA welding”, AWS, July, (1988), pp.150s-156s
- 6)황종근, 장경복, 강성수, “304 스테인리스강의 Plug 용접성에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제 16권, 제1호, (1998)

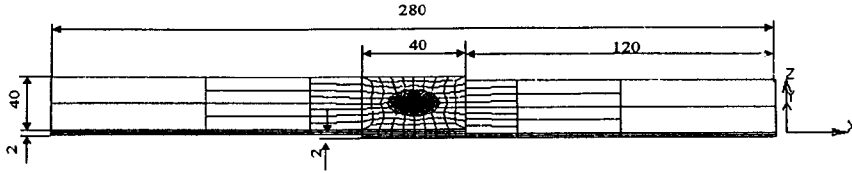
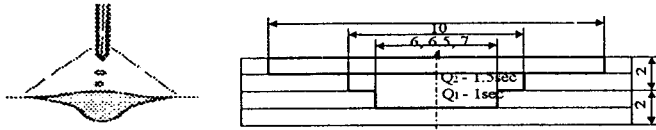
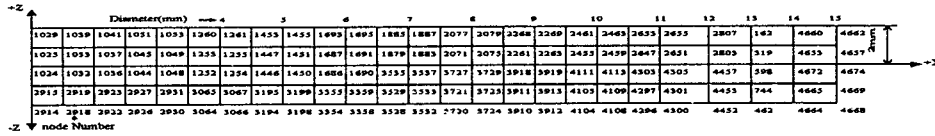


Fig 1. Mesh generation

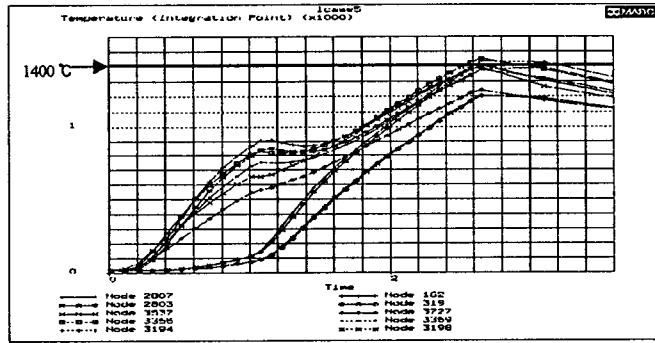


(a) Shape of weld metal for Ar shielding gas (b) Heat input model for FEM

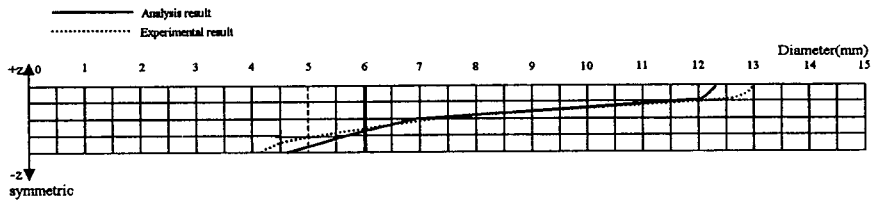
Fig 2. Heat input model



(a) node number

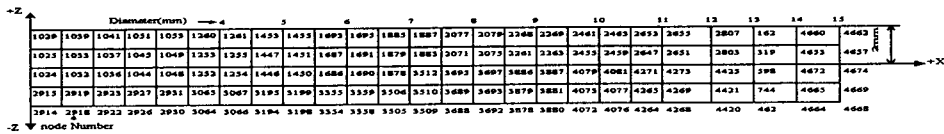


(b) Thermal cycle

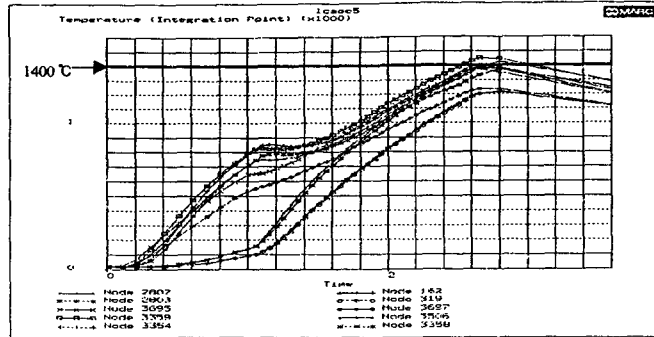


(c) Nugget shape

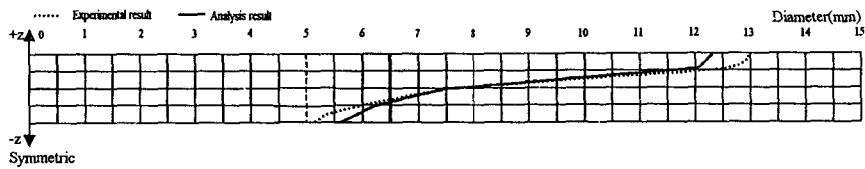
Fig 3. Node number, thermal cycle, and nugget shape for 6mm hole diameter



(a) node number



(b) Thermal cycle

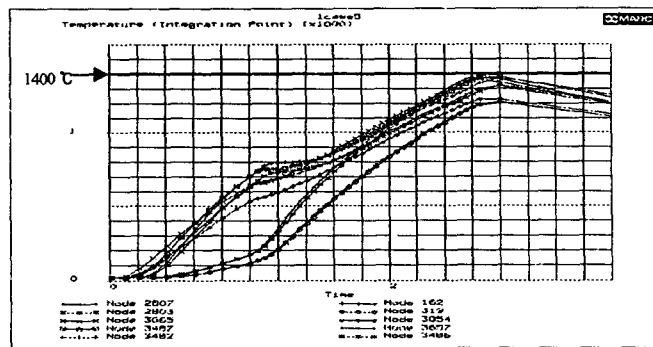


(c) Nugget shape

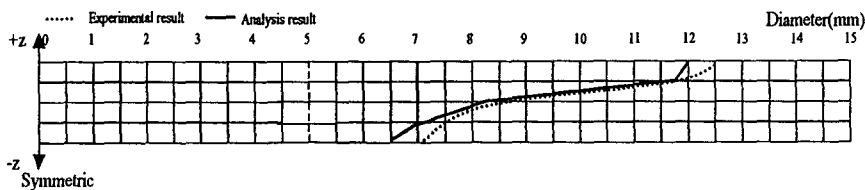
Fig 4. Node number, thermal cycle, and nugget shape for 6.5mm hole diameter

		Diameter(mm)																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	H							
1039	1039	1041	1031	1032	1260	1261	1432	1432	1692	1692	1882	1882	2071	2071	2268	2268		2461	2461	2652	2652	2807	142	4828
1037	1037	1037	1043	1049	1252	1252	1447	1451	1687	1691	1879	1882	2071	2073	2261	2262	2452	2452	2647	2651	2802	319	4821	4822
1034	1032	1036	1044	1048	1252	1254	1444	1450	1684	1690	1878	1882	2063	2063	2254	2252	2447	2447	2639	2637	2789	398	4840	4842
2013	2019	2023	2027	2051	2062	2192	2199	2322	2328	2482	2487	2627	2621	2817	2816	4071	4042	4232	4237	4389	744	4832	4837	
2014	2018	2022	2026	2050	2064	2094	2194	2198	2324	2328	2482	2484	2624	2620	2816	2816	4040	4044	4232	4236	4388	462	4832	4834
-z																	node Number							

(a) node number



(b) Thermal cycle



(c) Nugget shape

Fig 5. Node number, thermal cycle, and nugget shape for 7mm hole diameter